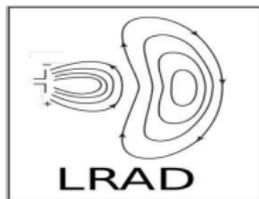


Blindaje de ondas Electromagnéticas en materiales no convencionales

Silvina Boggi - Walter G. Fano

July 31, 2020



Presentación del trabajo

- Introducción

Presentación del trabajo

- Introducción
- Metamateriales

Presentación del trabajo

- Introducción
- Metamateriales
- Modelo de Permitividad eléctrica efectiva de un metamaterial. Simulación del modelo. Verificación de la causalidad aplicando la transformada de Hilbert.

Presentación del trabajo

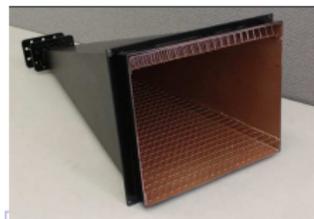
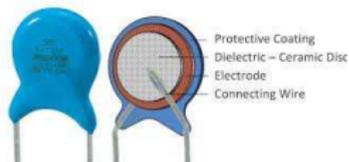
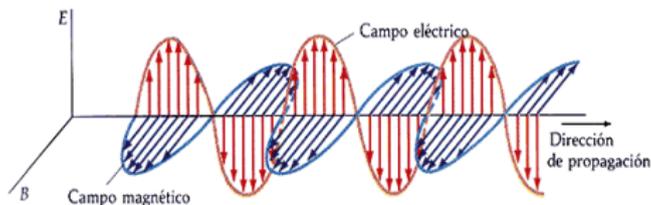
- Introducción
- Metamateriales
- Modelo de Permitividad eléctrica efectiva de un metamaterial. Simulación del modelo. Verificación de la causalidad aplicando la transformada de Hilbert.
- Aplicación Tecnológica: Medición de eficiencia de blindaje de un metamaterial

Presentación del trabajo

- Introducción
- Metamateriales
- Modelo de Permitividad eléctrica efectiva de un metamaterial. Simulación del modelo. Verificación de la causalidad aplicando la transformada de Hilbert.
- Aplicación Tecnológica: Medición de eficiencia de blindaje de un metamaterial
- Conclusiones

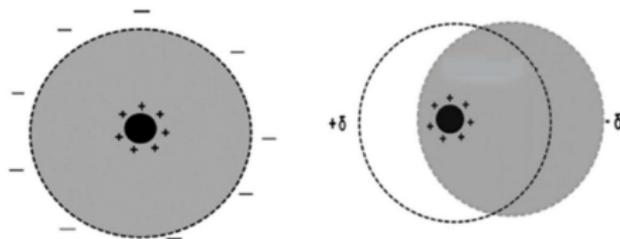
Estado actual del conocimiento

La propagación de ondas electromagnéticas en medios dispersivos presenta interés tecnológico en la actualidad en diferentes campos de las ciencias e ingenierías. Los materiales magnéticos y dieléctricos son muy utilizados para diseñar dispositivos electrónicos tales como transformadores, absorbedores electromagnéticos, antenas, etc.



Al propagarse una onda electromagnética en un material dieléctrico:

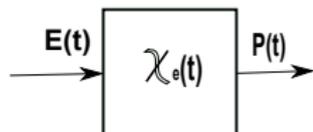
Polarización eléctrica



- En un dieléctrico no hay desplazamiento de cargas.
- La acción del campo eléctrico modifica ligeramente las órbitas y los centros de masa de los átomos y moléculas.
- Se obtiene un efecto de polarización eléctrica, mediante la aparición de dipolos eléctricos dentro del material.

Puede considerarse como un sistema lineal sujeto a una **excitación de entrada, el campo eléctrico \mathbf{E}** , cuya **respuesta es la polarización \mathbf{P}**

$$\mathbf{P}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \epsilon_0 \chi_e(\tau) \mathbf{E}(t - \tau) d\tau$$



Siendo el producto de convolución:

$$\mathbf{P}(t) = \epsilon_0 (\chi * \mathbf{E})(t)$$

χ_e es la **Susceptibilidad eléctrica**

Aplicando la transformada de Fourier: $\mathbf{P}(\omega) = \epsilon_0 \chi(\omega) \mathbf{E}(\omega)$

La polarización contribuye a incrementar la densidad de flujo eléctrico \mathbf{D}

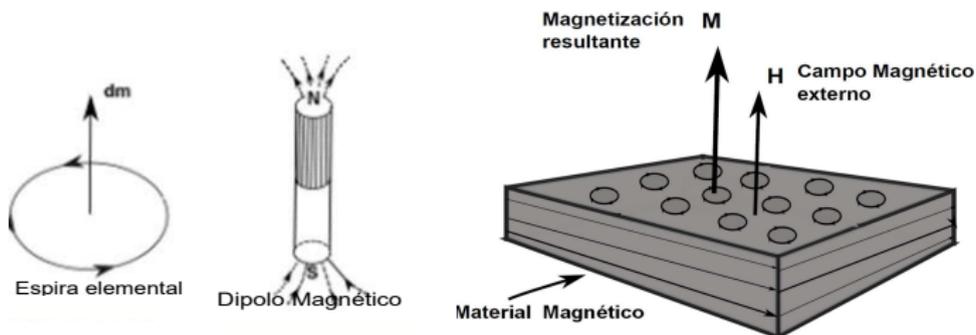
$$\mathbf{D}(\omega) = \epsilon_0 \mathbf{E}(\omega) + \mathbf{P}(\omega)$$

$$\mathbf{D}(\omega) = \varepsilon(\omega) \mathbf{E}(\omega)$$

Permitividad eléctrica: $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 (1 + \chi_e(\omega))$

Propagación electromagnética en medios magnéticos

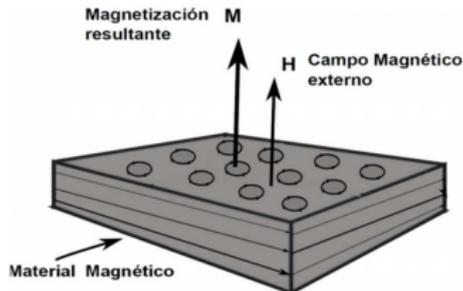
Polarización magnética. Magnetización (M)



- El efecto de la corriente sobre la espira constituida por la órbita del o de los electrones es el de producir un campo magnético a la distancia.
- Momento angular intrínscico o de espín.
- Alineación de los dipolos magnéticos inherentes al material.

Permeabilidad Magnética

La Magnetización **M** contribuye a aumentar la densidad de flujo magnético **B** del material



$$\mathbf{M}(\omega) = \chi_m(\omega)\mathbf{H}(\omega)$$

Susceptibilidad magnética:
 $\chi_m(\omega)$

$$\mathbf{B}(\omega) = \mu_0(\mathbf{H}(\omega) + \mathbf{M}(\omega))$$

$$\mathbf{B}(\omega) = \mu(\omega)\mathbf{H}(\omega)$$

Permeabilidad Magnética

$$\mu(\omega) = \mu_0(1 + \chi_m(\omega))$$

Principio de causalidad

En los materiales que poseen pérdidas, los parámetros χ , ϵ y μ son funciones complejas de la frecuencia

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega)$$

En las frecuencias en las que se produce dispersión, se establece una dependencia entre los vectores **D** y **B** con los valores de la función **E**(t) y **H**(t) respectivamente en todos los instantes anteriores.

Ecuaciones de Kramers- Kronig

$$\chi'(\omega) = -\frac{1}{\pi} VP \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\chi''(\omega')}{\omega' - \omega} d\omega'$$

$$\chi''(\omega) = \frac{1}{\pi} VP \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\chi'(\omega')}{\omega' - \omega} d\omega'$$

Las relaciones de KK suponen nexo causal entre **B** y **H** y entre **D** y **E**

La ecuación también se puede expresar como:

$$\chi'' = H_T(\chi')$$

Siendo H_T la transformada de Hilbert.

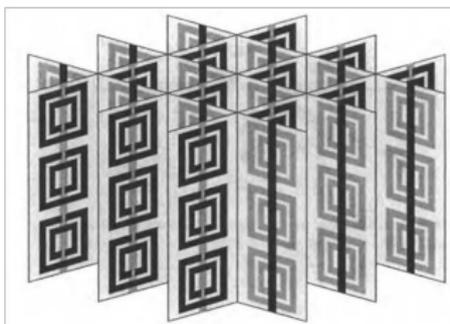
- Los primeros en hallar estas relaciones fueron H.A. Kramers y R. de Kronig - 1927
- Las relaciones de Kramers Kronig se pueden utilizar para la reconstrucción de la función $\chi(\omega)$ completa por sus partes real o imaginaria, medidas en el intervalo de frecuencias lo más ancho posible.
- Desde el punto de vista físico, la relación que existe entre χ' y χ'' expresa que los mecanismos de almacenamiento y disipación de la energía son dos aspectos del mismo fenómeno.

METAMATERIALES

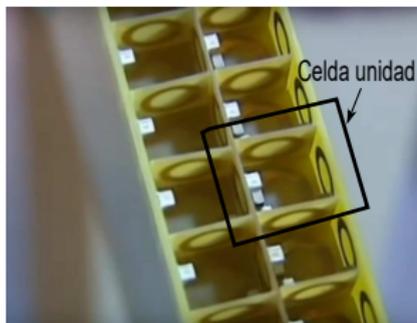
Metamateriales

Los metamateriales son elementos fabricados de forma artificial en el laboratorio a partir de sustancias naturales, que poseen propiedades que no se encuentran en la naturaleza

Este gran descubrimiento científico abrió el camino a aplicaciones insospechadas en los campos de la óptica (entre ellas la invisibilidad) y las telecomunicaciones

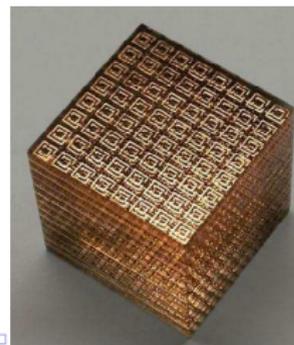


Metamateriales Electromagnéticos



◆ Son estructuras artificiales que consisten en repeticiones periódicas de un patrón formado por metales y dieléctricos (celda unidad) cuyas propiedades electromagnéticas se pueden controlar dado que dependen del diseño de la estructura.

Metamaterial construido con una estructura periódica de anillos abiertos y alambres aislados. (foto de Physics Today)

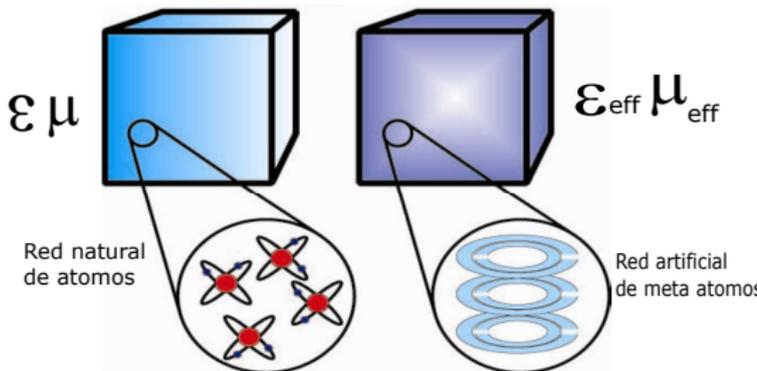


Parámetros constitutivos efectivos

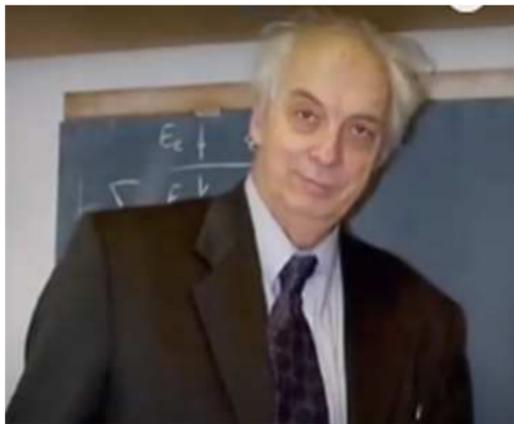
Siendo la longitud de onda de la radiación mucho mayor que la longitud de la celda unidad, esta radiación no alcanza a detectar la estructura interna.

◆ Las propiedades electromagnéticas no dependen de los átomos que forman sus materiales, sino de cómo responden al campo electromagnético los "meta-átomos" que lo forman.

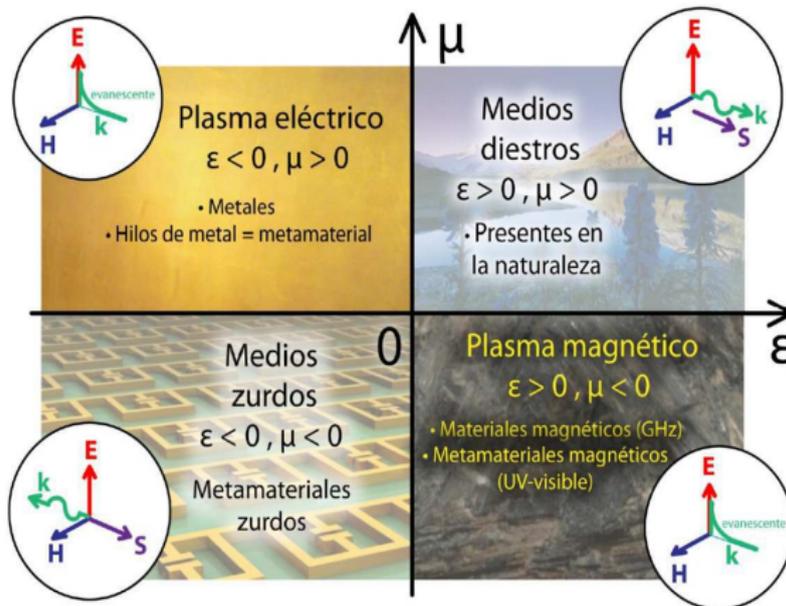
Medios naturales Metamateriales



El concepto físico de Metamaterial fue desarrollado por Viktor Veselago en 1967. Cuarenta años antes de que se pudiera construir el primer metamaterial. Veselago concibió en su imaginación un nuevo material que tuviese simultáneamente la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética negativas en el mismo rango de frecuencias, obteniendo como resultado teórico una capacidad de alterar el ángulo de refracción de las ondas electromagnéticas

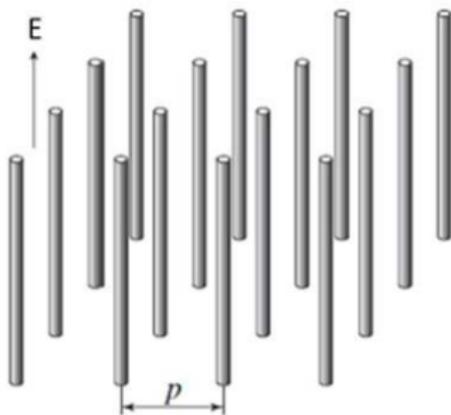


Comportamiento de la radiación electromagnética en los medios según el signo de su permitividad eléctrica y su permeabilidad magnética



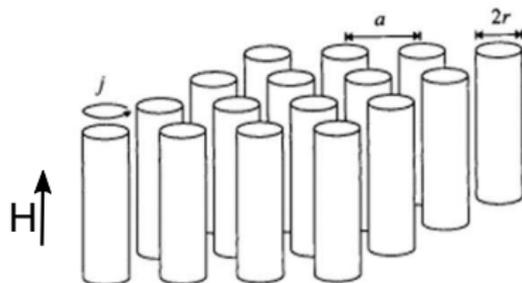
Metamaterial con $\epsilon < 0$ y $\mu > 0$

Sir John Pendry, del Imperial College de Londres, (en 1996) construyó un material de varillas metálicas muy finas que tenía permitividad negativa en el rango de los GHz y permeabilidad positiva.

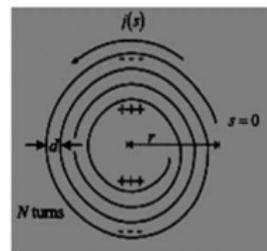
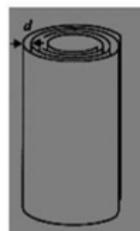


Metamaterial con $\epsilon > 0$ y $\mu < 0$

En 1999 Sir Pendry construyó un medio periódico compuesto por cilindros con anillos de metal concéntricos y abiertos por lados opuestos, SPLIT RING RESONATORS (SRRs)(anillos resonantes) que posee permeabilidad negativa en el mismo rango de GHz.



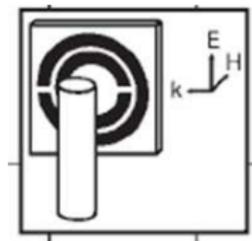
Estructura del metamaterial



vista del elemento

Metamaterial con $\epsilon < 0$ y $\mu < 0$

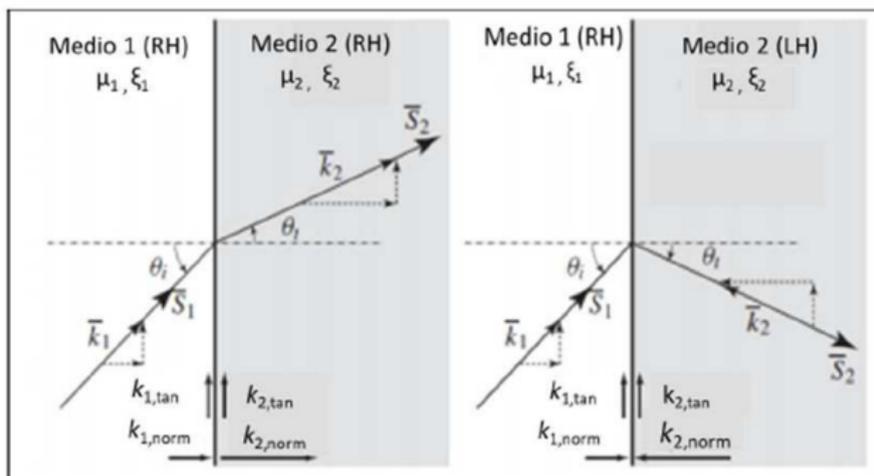
Combinando estos dos materiales David Smith de la Universidad de California San Diego en el año 2000, sintetizó el primer metamaterial con $\epsilon_{eff} < 0$ y $\mu_{eff} < 0$ lo que conducía a un material con índice de refracción negativo.



Índice de refracción negativo

Ley de Snell

$$n_1 \text{sen}(\theta_i) = n_2 \text{sen}(\theta_t)$$



Configuración experimental utilizada para la demostración de la naturaleza LH de la estructura del metamaterial en una frecuencia alrededor de 5 GHz

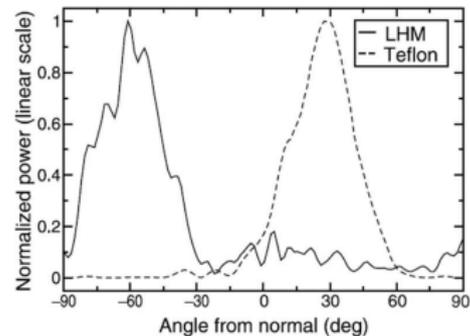
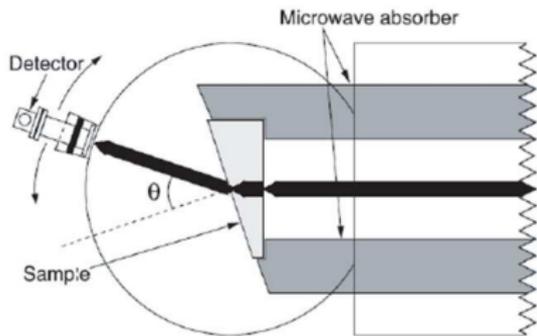
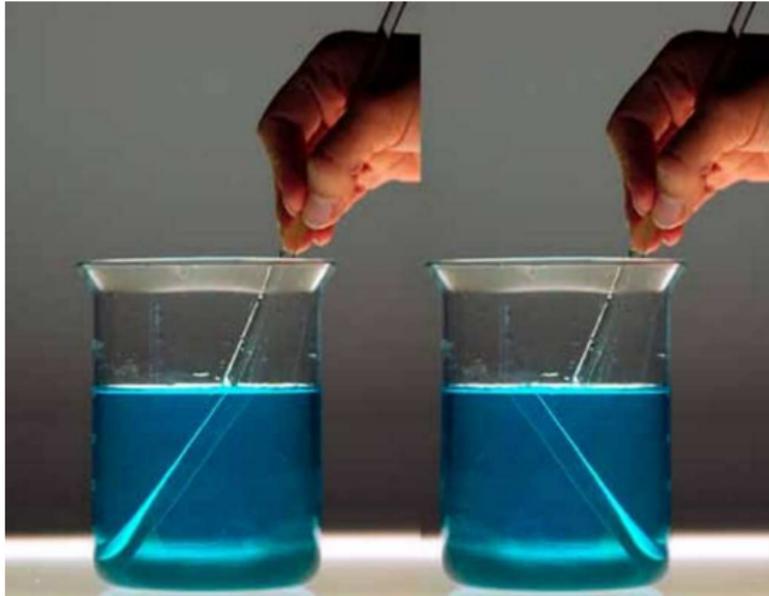


Fig. 3. Transmitted power at 10.5 GHz as a function of refraction angle for both a Teflon sample (dashed curve) and a LHM sample (solid curve).

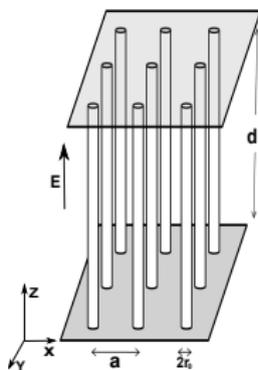
Shelby, R. A. and Smith, D. R. and Schultz, " S. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction" American Association for the Advancement of Science. Volume 292, pages 77-79,(2001).



Si el agua tuviese índice de refracción negativo, la varilla parecería doblarse hacia "el otro lado"

SIMULACIÓN DE LA PERMITIVIDAD ELÉCTRICA EFECTIVA EN UN METAMATERIAL - TLM

Modelo de Permitividad eléctrica efectiva



$a \ll \lambda$ (condición de homogeneidad)

Sistema de conductores cilíndricos ubicados entre dos placas separadas una distancia d , sometido al campo eléctrico externo (E) de polarización paralela al eje de los cables.

El contenido de la celda definirá la respuesta efectiva del sistema completo:

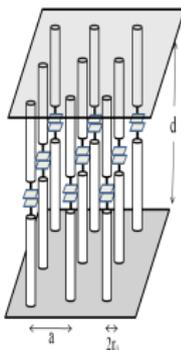
$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_{eff} \vec{E}$$

La relación entre el vector desplazamiento eléctrico \vec{D} con el vector campo eléctrico \vec{E} y el vector polarización dentro de un medio \vec{P}

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

Considerando Z_{int} la impedancia interna por unidad longitud de los cables conductores y la inductancia de la celda L

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \frac{\vec{E}}{j\omega a^2(j\omega L + Z_{int})}$$



Permitividad efectiva del metamaterial

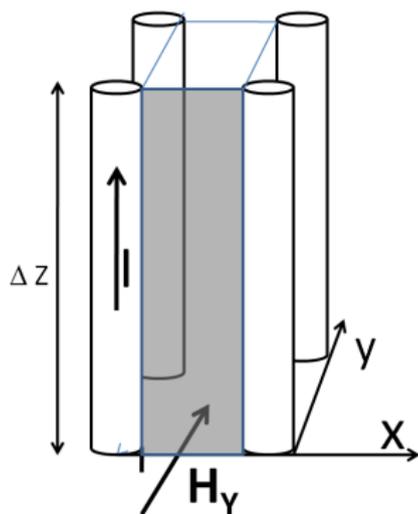
$$\epsilon_{eff} = \epsilon_0 + \frac{1}{j\omega a^2(j\omega L + Z_{int})}$$

Permitividad efectiva del metamaterial con capacitores

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_0 + \frac{1}{j\omega a^2 \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + Z_{int} \right)}$$

Cálculo de la inductancia de la celda

Considerando la inductancia L por unidad de longitud de la celda unidad, que incluye el acoplamiento mutuo entre los conductores.

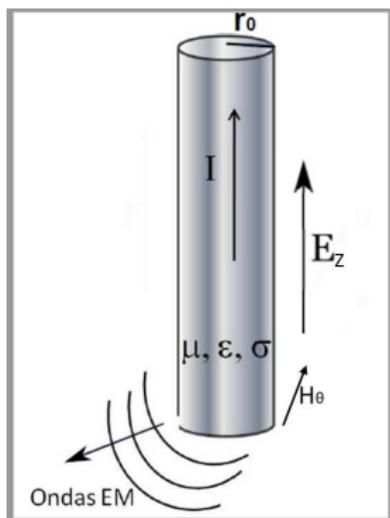


$$L = \frac{\mu_0 \int H_y dx}{I}$$

Inductancia L

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{a^2}{4r_0(a-r_0)}$$

Impedancia interna del conductor



Impedancia interna del conductor Z

$$Z_{int} = \frac{E_z(r_0)}{I(r_0)} = \frac{E_z(r_0)}{2\pi r_0 H_\theta(r_0)}$$

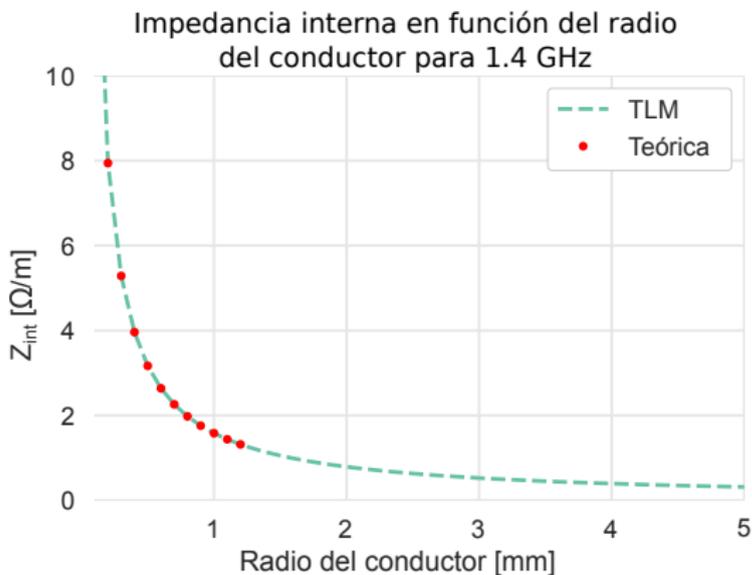
$E_z(r_0)$ y $H_\theta(r_0)$ los campos eléctricos y magnéticos dentro del conductor

Ecuación de Bessel

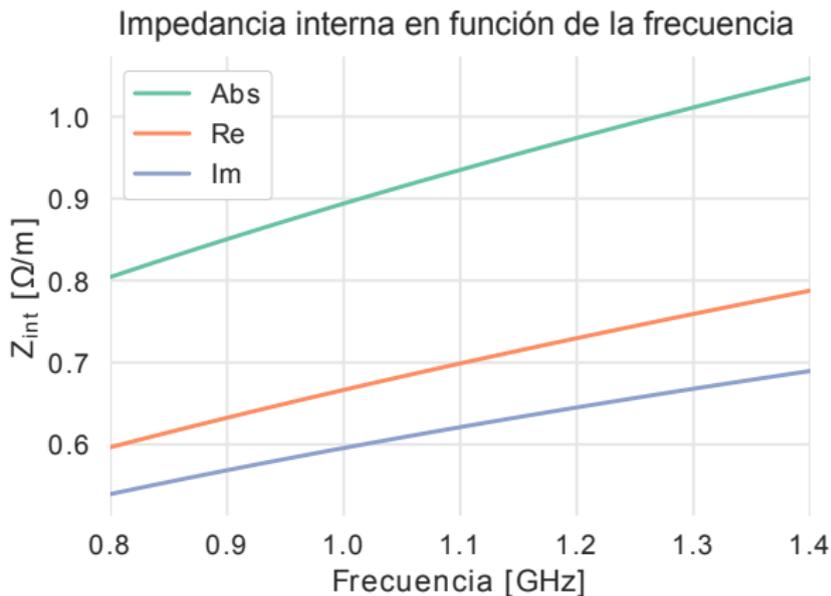
$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial(\gamma\rho)^2} + \frac{1}{\gamma\rho} \frac{\partial E_z}{\partial(\gamma\rho)} - E_z = 0$$

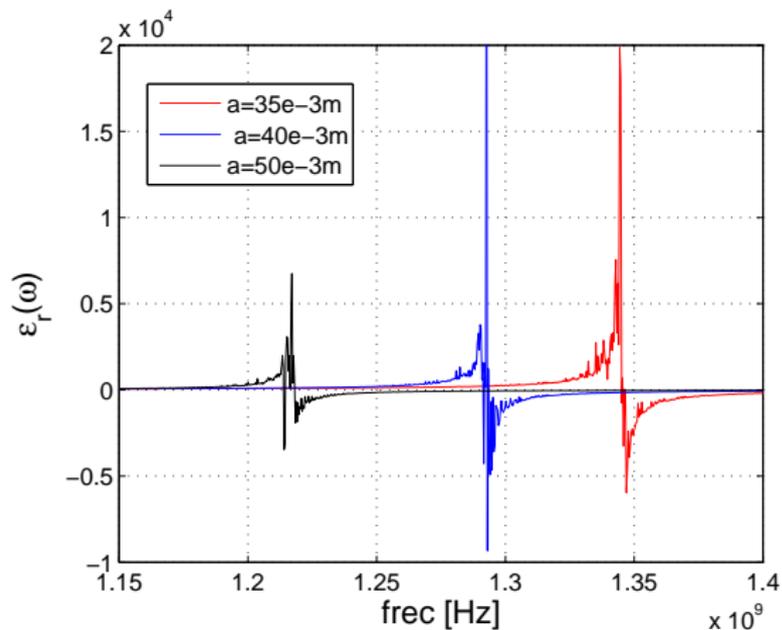
$$H_\phi = \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial E_z}{\partial\rho}$$

Impedancia interna del conductor



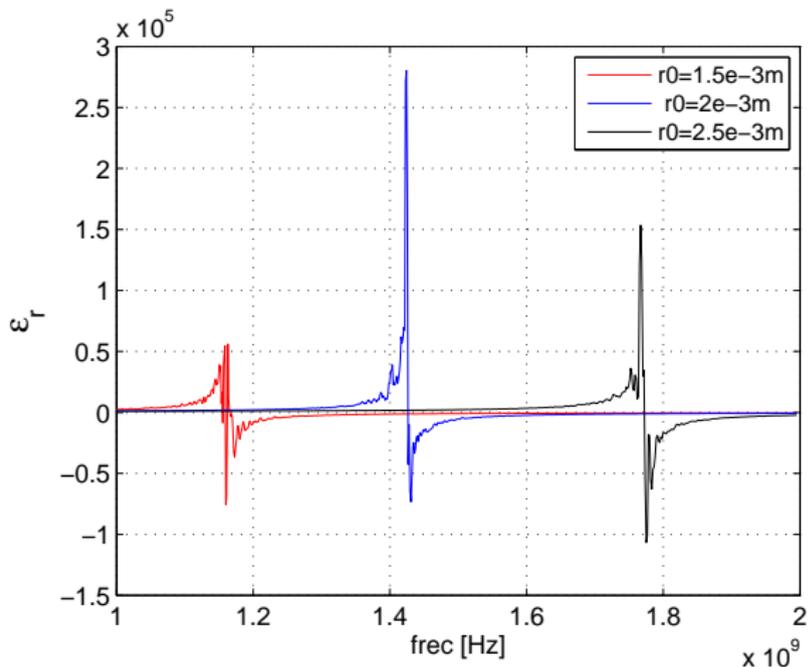
Impedancia interna del conductor





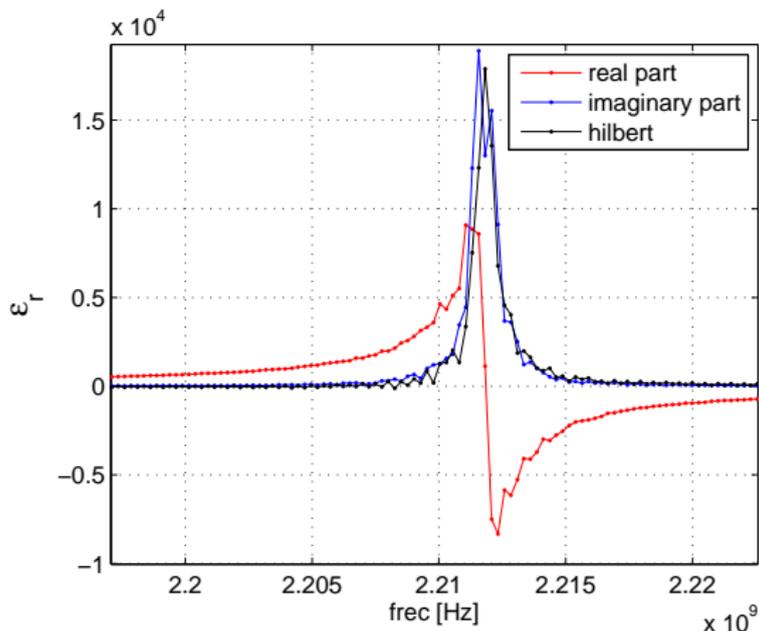
Permitividad eléctrica efectiva del metamaterial en función de la frecuencia para diferentes celdas considerando el radio constante del conductor

$$r_0 = 2 \cdot 10^{-3} m$$



Permitividad eléctrica efectiva en función de la frecuencia para diferentes radios considerando un tamaño de celda constante $a = 30 \text{ mm}$

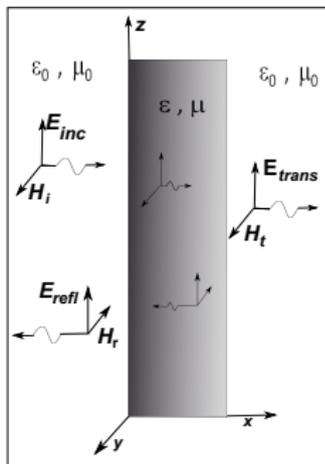
Verificación de causalidad del Modelo



Se simuló numéricamente, con el software OCTAVE: Parte real y parte imaginaria de la permitividad eléctrica efectiva del metamaterial simulada por el modelo y parte imaginaria calculada con la transformada de Hilbert. Tamaño de celda: $a = 30 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, y el radio $r = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

APLICACIÓN TECNOLÓGICA - EFICIENCIA DE UN BLINDAJE

Blindaje electromagnético



Blindaje: Barrera a la transmisión de los campos electromagnéticos.

Eficiencia de un blindaje

$$SE_{DB} = 20 \log \left| \frac{E_{inc}}{E_{trans}} \right|$$

- La fuente de radiación se encuentra lo suficientemente lejos, de manera que incide en el blindaje una onda plana.
- Las zonas a izquierda y a derecha del blindaje son de aire.
- En la zona de la derecha solo se tendrán ondas transmitidas.
- En la zona de la izquierda se tendrán ondas incidentes y reflejadas.

Esta eficiencia de blindaje es la suma de tres términos:

$$SE_{(dB)} = R_{DB} + A_{DB} + M_{DB}$$

$$R_{DB} = 20 \log \left| \frac{(Z_0 + Z_s)^2}{4Z_0 Z_s} \right| \text{ (pérdidas de reflexión)}$$

$$A_{DB} = 20 \log e^{-k_0 \alpha_s t_s} \text{ (pérdidas de atenuación)}$$

$$M_{DB} = 20 \log \left| 1 - \left(\frac{Z_0 - Z_s}{Z_0 + Z_s} \right)^2 e^{2jk_{xs} t_s} \right| \text{ (pérdidas por reflexiones dentro de la pantalla)}$$

Siendo $k_{xs} = \beta_s - j\alpha_s$ la constante de propagación de la pantalla, k_0 la constante de propagación del espacio libre, Z_0 y Z_s las impedancias características asociadas al espacio libre y a la pantalla respectivamente.

La eficiencia de blindaje de un metamaterial se evalúa a través de la medición de los **parámetros de dispersión** que determinan la relación de potencia de la onda transmitida a través del metamaterial con respecto a la onda incidente.

Parámetros de dispersión

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

S_{11} : coeficiente de reflexión

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

S_{21} : coeficiente de transmisión.

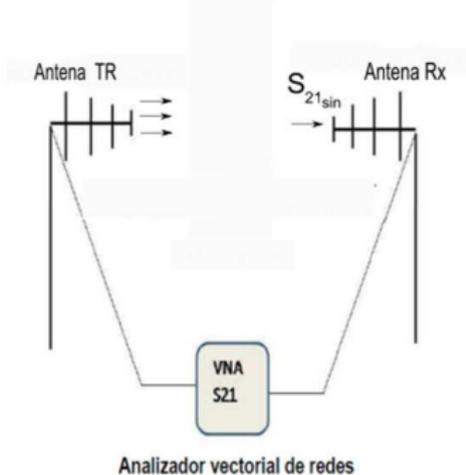
Red de dos puertos



a_1 y b_1 representan ondas incidente y reflejada en el puerto 1.

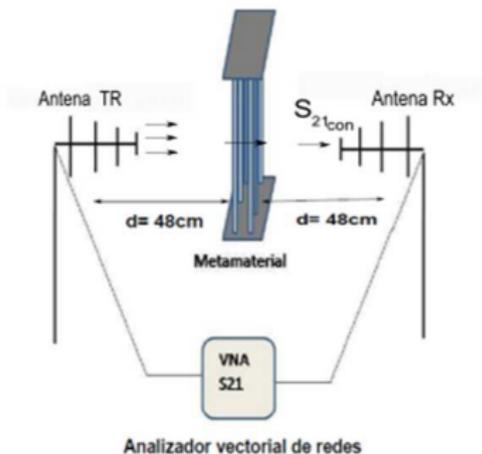
a_2 y b_2 representan ondas incidente y reflejada en el puerto 2.

Procedimiento experimental - Banco de medición

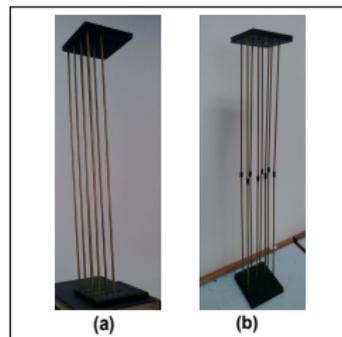
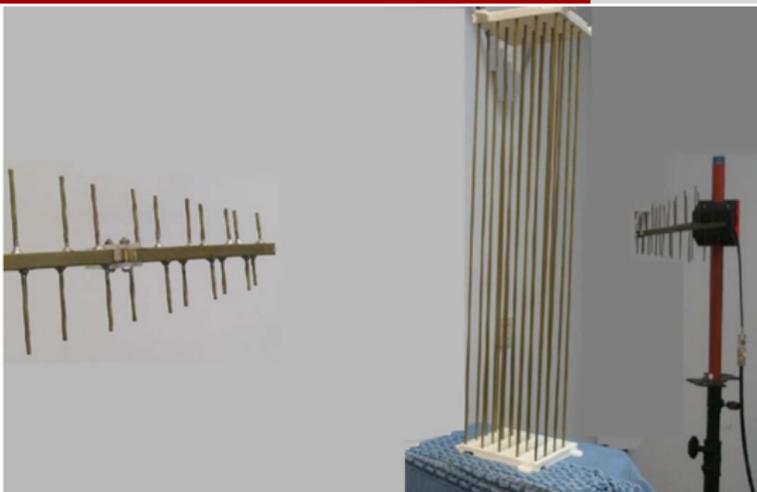


Se miden **los coeficientes S21** que evalúan la relación de potencia recibida en la antena receptora con respecto a la enviada por la antena transmisora **con y sin el metamaterial.**

Se emite una onda plana con el analizador de redes **a través de la antena transmisora y se mide la respuesta en la antena receptora**

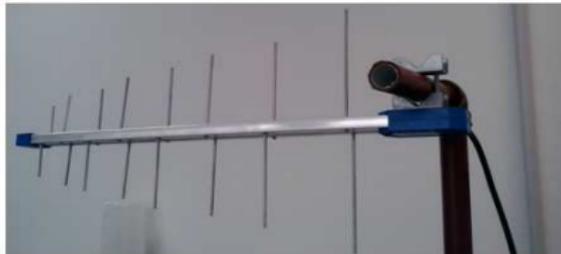


La diferencia entre los coeficientes S21 da como resultado la eficiencia de blindaje.



Campo lejano $r > \frac{2D^2}{\lambda}$. La distancia entre la antena transmisora y el metamaterial y entre el metamaterial y la antena receptora fue $r = 48\text{cm}$, la dimensión más grande de la antena transmisora era $D = 14\text{cm}$.





(a)

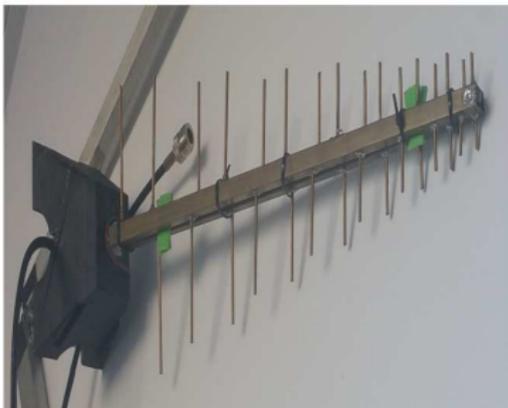


(b)

Antenas utilizadas en las mediciones

(a) banda 400-900 MHz

(b) banda 900-4000 MHz



(a)



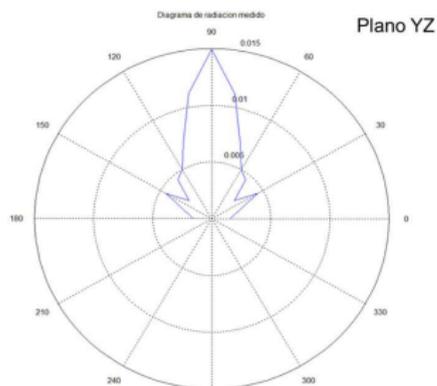
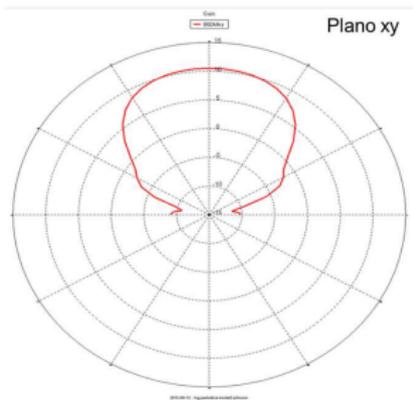
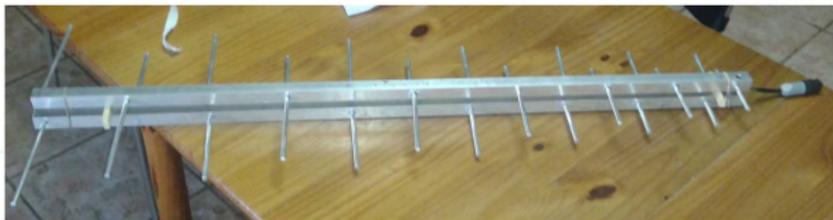
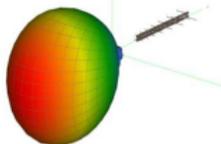
(b)

(a) La antena utilizada para mediciones

(b) Analizador vectorial de redes.

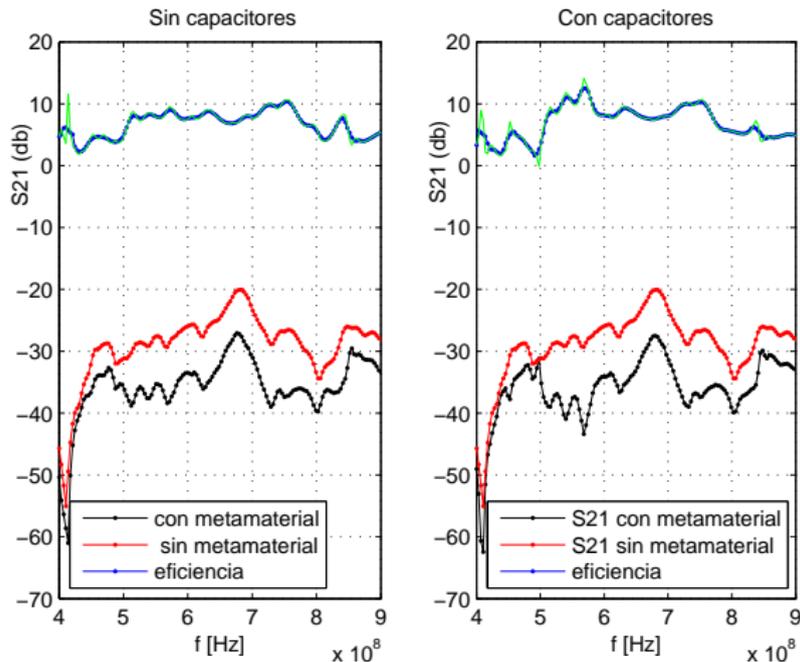
Antena de banda 500- 800 MHz

CAD Feko v5.5

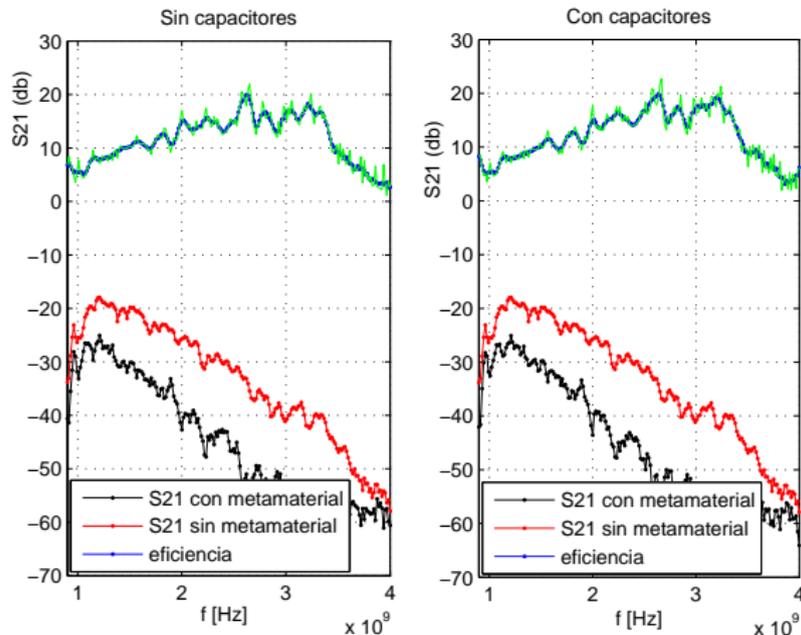


RESULTADOS

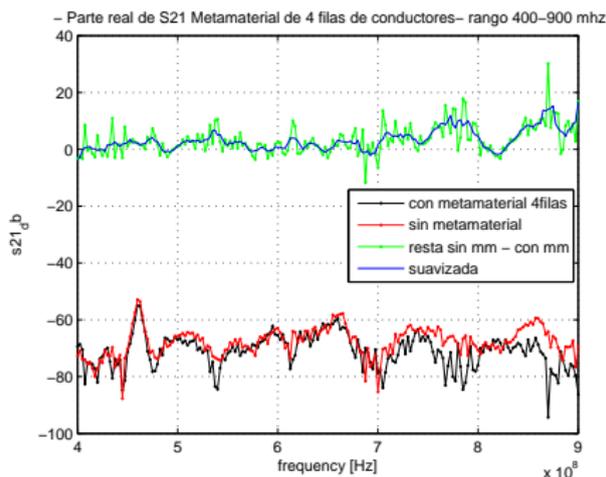
Eficiencia del blindaje del metamaterial sometido a campo eléctrico polarizado en dirección vertical (400 -900 MHz)



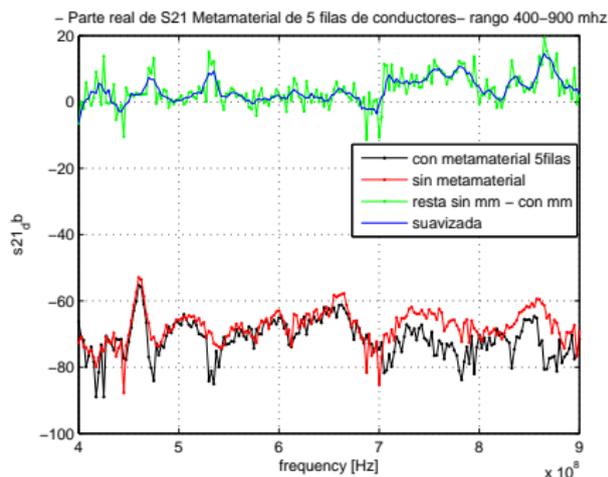
Eficiencia del blindaje del metamaterial sometido a campo eléctrico polarizado en dirección vertical (900- 4000 MHz)



Eficiencia del blindaje sometido a campo eléctrico polarizado en dirección vertical (rango 400-900 MHz)



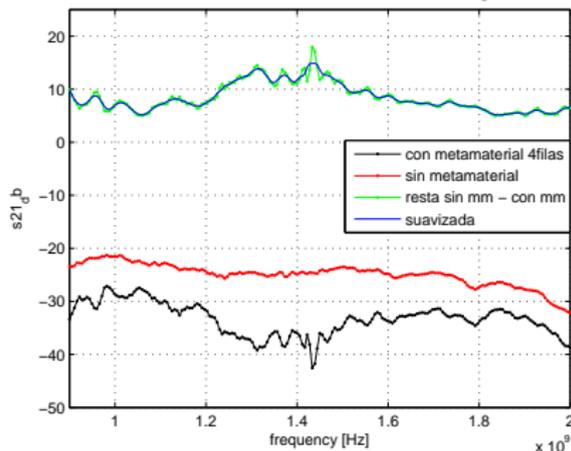
4 filas de conductores de cobre



5 filas de conductores

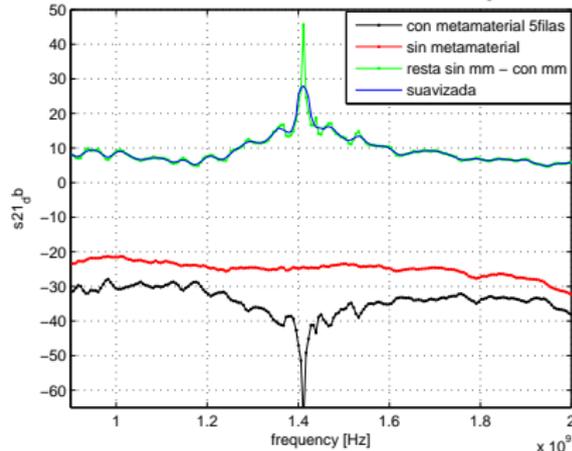
Eficiencia del blindaje sometido a campo eléctrico polarizado en dirección vertical (rango 900-20000 MHz)

Parte real de S12 –Metamaterial con4 filas de conductores– rango 900–2000 mhz



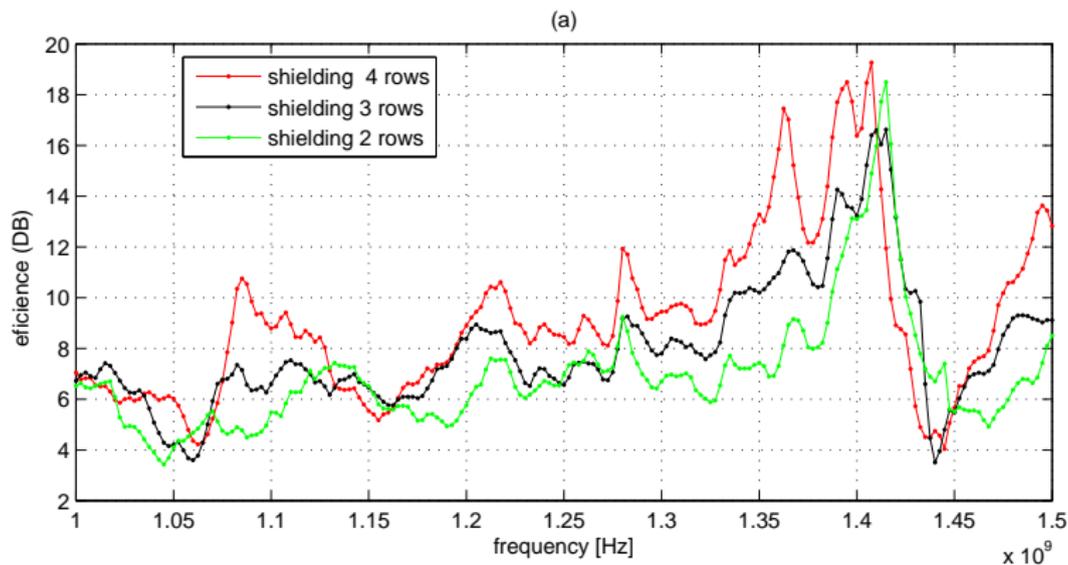
4 filas de conductores de cobre

Partes reales de S12 Metamateria con5 filas de conductores– rango 900–2000 mhz

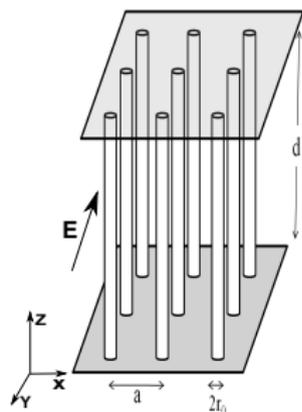
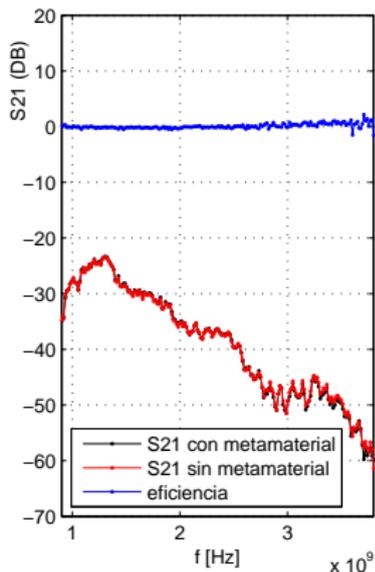
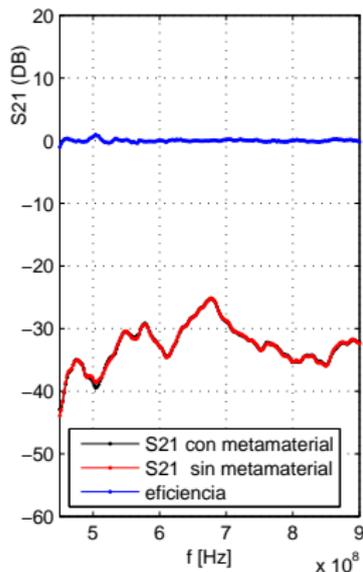


5 filas de conductores de cobre

Eficiencia del blindaje del metamaterial sometido a campo eléctrico polarizado en dirección vertical



Eficiencia del metamaterial sometido a una onda plana con el campo eléctrico polarizado en dirección horizontal



- Campo eléctrico perpendicular al eje de los cilindros.

Conclusión final

- El estudio detallado de modelos de propiedades electromagnéticas en metamateriales es un importante aporte para la construcción de nuevos dispositivos en el campo de las telecomunicaciones. En esta trabajo se utilizó un metamaterial para blindajes electromagnéticos que resulta muy conveniente dado el bajo peso respecto a los utilizados en general y es además muy económico.

Referencias

- W. G. Fano; S. Boggi and A. Razzite. " Causal System and Numerical Response of the Magnetic Permeability as a Function of the Frequency of Ferrites using Kramers Kronig Relations" *Physica B Condensed Matter*. Volumen 403 pages 526-530 (2008)
- V. G. Veselago, " THE ELECTRODYNAMICS OF SUBSTANCES WITH SIMULTANEOUSLY NEGATIVE VALUES OF μ AND ϵ " *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, pp. 509- 514, (apr 1968).
- J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, " Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures" *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, pp. 4773-4776, (Jun 1996).
- J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, " Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena" *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, pp. 2075-2084, (Nov 1999).
- D. R. Smith and N. Kroll, " Negative refractive index in left-handed materials" *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, pp. 2933-2936, (Oct 2000).
- S. Boggi; A. Kieselesky; W. G. Fano" Metamaterial's effective electric permittivity model". XVI Workshop on Information Processing and Control (RPIC) (2015)
- S. Boggi, R. Alonso, and W. G. Fano. "Effectiveness of a metamaterial measured at microwave range of frequency, known as wire screen metamaterial (WSM)" *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 63, page 33-46, (2018).

